

离心泵汽蚀性能改善研究

李佳佳 王星文 钱贵福 彭成栋 伍丽娟*

(长江大学石油工程学院 湖北武汉 430100)

摘要：根据离心泵汽蚀原理，分析了汽蚀的影响因素，探究了提高离心泵汽蚀性能的方法。结合当前主要使用的数值模拟分析方法，得出了当前离心泵汽蚀的改善方向主要在泵的结构方面的结论，关于离心泵汽蚀性能研究未来仍有较大发展空间。

关键词：离心泵；汽蚀；数值模拟

1. 前言

离心泵，一种应用极其广泛的通用流体机械。据公开资料显示，2019 年全球离心泵的销量约 5000 W 台，国内离心泵销量约占 1/4。其原理是利用原动机通过泵轴带动叶轮旋转，对液体做功使其能量增加，从而使一定数量的液体从吸入池经泵的过流部分，输送到要求的高度或要求压力的地方的一种机械。它广泛的应用于给水排水及农业工程、工业工程、航空航天和航海工程、车辆工程等等。在石油天然气的储存和运输工程中，同样也广泛地使用离心泵，用来增加流体的能量，克服流体阻力，达到沿管路输送的目的。因此对离心泵性能的优化，预防泵的损坏，开展对汽蚀性能影响的研究具有重要意义。

1.1 离心泵汽蚀机理^[1]

离心泵汽蚀是指运行过程中，被输送的液体流到叶片入口附近，某处的绝对压力低于当前温度下该液体的汽化压力，于是液体汽化形成小气泡。当气泡随液流向前流动到高压部分时，由于承受不了压力破裂，周围的液体会向气泡中心快速挤压，从而产生巨大的冲击力。长时间在这种情况下工作使得离心泵过流部件的表面形成许多无规则的麻点、凹坑。这种现象被称为汽蚀。

1.2 离心泵汽蚀的危害

在发生汽蚀的短期内，由于受到介质的持续冲击，会造成流体紊乱的现象，同时也会产生噪声和震动，严重时将导致离心泵不能正常运行。不过，短时间内也有一种情况是效率变得更高，这是由于过流部分被气泡覆盖，形成光滑层使得水力摩擦阻变小

但长期看来，高频率的高压力的冲击会使金属表面产生机械剥蚀，同时伴随着电化学腐蚀等多种复杂作用，严重者会被击穿，产生极大的安全隐患。

此外，在使用过程中，发生汽蚀也会影响叶轮内部液体的能量交换，使泵的各项性能变差。如图所示，流量 Q-扬程 H 曲线、流量 Q-效率 η 曲线和流量 Q-轴功率 p 曲线都会出现明显的下降，严重时会使离心泵断流。

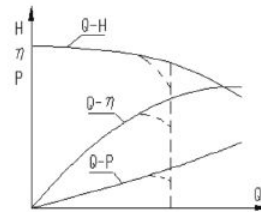


图 1 离心泵的特性曲线

2. 离心泵汽蚀的影响因素

要想避免发生汽蚀，需要满足在叶片入口处的最低液流压力 $P_t > P_v$ 此温度下的气化压力 P_v ，即 $P_t = P_s + \Delta h_s$ 。

Δh_s ，汽蚀余量，也叫净正吸上水头，分为有效汽蚀余量 Δh_a 和必需汽蚀余量 Δh_r 。为了保证离心泵不发生汽蚀，要求 $\Delta h_a - \Delta h_r > 0.3m$ ，因此在防止措施中要使 Δh_a 值越大而 Δh_r 值越小的情况下离心泵不会发生汽蚀。

2.1 有效汽蚀余量 Δh_a

$$\Delta h_a = \frac{P_s}{\rho} - \frac{P_v}{\rho} + \frac{c_s^2}{2} = \frac{P_s}{\rho} - \frac{P_v}{\rho} - gH_{g1} - h_{A-S} \quad (1)$$

P_s ——液流进口压力，Pa;

P_v ——此温度下的汽化压力，Pa;

C_s ——液流进口速度， m^2/s ;

ρ ——液体密度， kg/m^3 ;

h_{A-S} ——吸入管路内流动损失，J/Kg

Δh_a 越大，泵越不容易发生汽蚀。 Δh_a 数值的大小只与泵装置的操作条件有关，而与泵本身的尺寸无关。

2.2 必需汽蚀余量 Δh_r

$$\Delta h_r = \lambda_1 \frac{c_0^2}{2g} + \lambda_2 \frac{W_1^2}{2g} \quad (2)$$

λ_1 ——绝对流速变化及流动损失引起的阻力系数，与泵进口几何形状有关;

λ_2 ——液流绕流叶片头部引起的阻力系数，也与叶片数、叶片头部形状有关;

C_0 ——叶轮进口处平均流速， m/s ;

W_1 ——叶片进口处液流相对速度， kg/m^3

Δh_r 越小, 泵越不容易发生汽蚀。影响 Δh_r 大小的主要因素是泵的结构, 也因此 Δh_r 的大小本质上是泵抗汽蚀性能的重要参数。

3. 解决措施

在增大有效汽蚀余量 Δh_a 方面^[2], 对于泵的要求, 一是考虑增大吸液罐液面上的压力 P_A , 合理确定泵的几何安装高度 H_{g1} , 这常常通过减少吸液面和离心泵安装位置之间的高度差来实现, 必要时许多集输装置采用灌注头吸入。这种方法虽然会增加一部分的安装成本, 但是操作方便适用, 是首推的方法之一。二是考虑减少吸入管路内流动损失 h_{A-s} , 因此需要尽可能增大泵吸入管的直径, 进口管道尽量短而平滑, 有尽量少的弯头阀门, 选择水头损失小的过流设备来减少压力损失, 避免在入口处产生漩涡和逆流。另外还要要求使用现场水流速度平缓, 不能有较大的漩涡, 定期清理淤泥杂物, 根据实际需要加破涡板。也可以选择离心泵入口前安装前置泵, 不仅能提高离心泵吸入压力, 增强离心泵的抗汽蚀性能, 同时也能提高离心泵的扬程。

在减小必需汽蚀余量 Δh_r 方面, 需要改进的往往是泵的结构。例如适当加大叶轮吸入口直径和叶片进口边宽度; 采用合理的叶片进口位置和前盖板形状; 采用双吸式叶轮; 在原型叶片的基础上, 减厚降高设计与原叶片数量相同, 呈交错布置的小叶片能够降低叶轮内湍动能强度和空泡体积, 优化流场结构, 从而提高低比转速离心泵的空化性能^[6]; 合适的叶片开槽^[9], 等等。除此之外, 采用超汽蚀叶形的诱导轮, 采用抗汽蚀材料也是行之有效的办法。

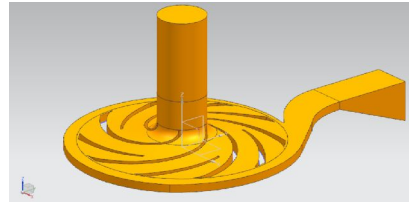
对于学者研究来说, 增大 Δh_a 的方法受使用环境的限制较大, 可供研究的变量不多。因此目前多数研究集中在对于离心泵本身的改造上, 即通过改变内部结构来减小 Δh_r 。

4. 研究方法

对于泵结构的改进, 通常使用的方法是实验研究和数值模拟。但实验研究数据不够精准, 制作实体模型较为复杂, 时间周期长, 成本高, 且无法在保留原有模型的情况下观测离心泵内部的汽化情况。但通过 fluent 软件来进行模拟探究, 只需要改变对应的软件参数, 便能模拟到与现场试验极为相似的结果, 这不仅极大地降低了研究的门槛, 还降低了研究的繁琐步骤。因此大多数研究采用数值模拟的方法。

4.1 离心泵的三维实体建模

叶轮部分是离心泵完成液体输送的主要部件, 同时也是离心泵的主要做功部件。离心泵叶轮普遍由前盖板、叶轮和后盖板组成。由于叶轮结构特殊及蜗壳影响, 前人文献中对叶轮流场的数值模拟多采用叶轮流道加蜗壳建模来进行, 以减少模拟误差。



4.2 三维实体建模网格划分

网格划分是进行数值模拟分析至关重要的一步, 它直接影响着后续分析结果的精确性。目前, 常用的网格划分软件有: ANSYS ICEM CFD、ANSYS Mesh、TGrid、GAMBIT 等。是由于离心泵结构内部流道复杂, 一般采用适应性良好的非结构化网格——四面体网格来进行划分。在经济性和准确性方面, 网格的密度越大, 计算结果也越趋于真实情况, 但对计算机的计算能力要求也越高, 同时消耗的计算时间也越多。因此一般离心泵网格划分时, 在叶轮叶片这样的主要计算区域网格密度会相对较大, 其他的部位网格密度则相对较小, 这样既能减少计算机负担, 缩短计算机的计算时间, 又保证了计算的精确性。

4.3 数值模拟

1) 求解器设置

通常选用定常模拟, 因此求解器的设置为稳态, 基于压力求解与绝对速度。

2) 流体计算模型的选择

① 多相流模型

在 Fluent 中, 多相流模型有 VOF 模型、混合模型和 Euler 模型。空化模型不能与显式的 VOF 选项一起使用, 这是因为面追踪模式和空化模型中的连续介质假设冲突; 混合模型常应用于拥有不同速度的多相流流体的模拟计算; Euler 模型一般应用于对多相分离流和相互作用的相的模拟计算, 但与离散相模型中 Eulerian-Lagrangian 方案只用于离散相不同的是, Euler 方案模拟多相流模型中的每一相。

对于离心泵的汽蚀多相流模型的选择, 较常用的模型为混合模型, 同时取消对滑移速度的勾选, 将空化理论模型改为 Zwart-Gerber-Belamri 模型。

② 粘性模型

在 fluent 中, 粘性模型有十种选择, 利用这些模型, 可以实现对无黏流动、层流以及湍流的模拟。由于设计中的离心泵流体流动为湍流流动, 常采用 k-epsilon 模型。

由于离心泵属于速度梯度较大和流线弯曲程度较大的流动; 同时由于设计中的进口域和出口域为静止区, 所以本设计又同时存在静止区和旋转区的计算。所以粘性模型最终选择使用 RNG k-epsilon 算法。

3) 边界条件设置

离心泵进口采用绝对速度进口，轴向流速大小由泵设计进口面积和流量决定。进口速度为：
$$v = \frac{Q}{\pi R^2} \quad (3)$$

进口湍流参数选择输入湍动能系数 k 与湍流耗散率 ε ，其计算方法如下：

$$\text{湍动能系数: } k = 1.5(vI)^2 \quad (4)$$

I ——湍流强度， $I=0.07L$

$$\text{湍流耗散率: } \varepsilon = C_{mu}^{0.75} k^{1.5} / I \quad (5)$$

C_{mu} ——经验常数，取为 0.09

离心泵出口常常采用压力出口，这样能减少回流造成的计算发散的情况，计算得到的数据收敛。也因此，在离心泵汽蚀性能的相关数值模拟研究中，一般采用逐渐降低出口压力的方法来控制流量，扬程和泵效率，从而更加系统的判断在不同负载的工作状况下不同泵结构的汽蚀性能，使得到的结果更加符合现实规律。

5. 结论与展望

通过对文献的查阅，近些年对于离心泵汽蚀问题的相关研究很多，有一些是从现实工况入手，通过做实验的方法，研究流量和转速对于汽蚀问题的影响，即研究如何提高有效汽蚀余量 Δh_a ，其余更多的则是从离心泵内部结构入手，探索改善机械结构，降低必需汽蚀余量 Δh_r 。

对于泵内部的机械结构，在诱导轮的改进上，可改变轴向距离，诱导轮叶片个数以及将诱导轮伸入吸水室一定程度^[1]，改变诱导轮叶缘与叶片根部厚度等。

在改善叶轮结构方面，可改善绘制叶片的数学模型，研究添加分流叶片，改变叶轮片数，加宽进口流道宽度，改进合适的叶片进口形状；增大叶片入口角，叶片厚度，叶片前缘倒角；对叶片出口部分进行修削等等。

还有一些对于叶轮内部的结构进行了完善和创新，例如增加旁通射流对离心泵内空化的产生得到有效的延缓和控制^[7]；叶轮后盖板布置粗糙带在空化发展初期可以有效阻止低压区向叶轮出口处扩张，从而延缓离心泵的空化进程^[8]；在原型叶片的基础上设计与原叶片数量相同，呈交错布置的小叶片能够优化流场结构，从而提高离心泵的空化性能^[6]等

等。

近年来，对于泵汽蚀的研究集中在改善泵本身的结构上，而利用数值模拟来验证改进猜想方式几乎形成了一套完整的体系。同时由于离心泵内的流动情况复杂，过流部件较多，汽蚀问题的影响因素更是不计其数，也因此可以改进的部位也有很多。但截至目前为止，对于空化问题的研究还不够深入，仍然没有办法对离心泵内部发生空化区域的流体形状进行全面的分类，也没有一个业界统一的指标比如空化面积或者气化液体的质量分数来确定空化的激烈程度。就目前而言，普遍做法仅仅只是根据面积来粗略的定性和比较不同机械结构对于离心泵空化性能的影响。上述问题表明了空化理论方面的不足。

而站在实际应用需要的方面来看，在未来，对于离心泵汽蚀问题的改善研究仍将继续，重点已经不再是技术问题，而是怎样提出一个在理论上站得住脚，在试验中经得起考证的机械结构。

参考文献：

- [1]李大勇,郭维民,唐洪岩.离心泵的汽蚀问题与防止措施[J].南方农机,2020,51(14):43-44.
- [2]钱锡俊,陈弘,泵和压缩机[M],东营,中国石油大学出版社,2007:43-57.
- [3]张爱民. 诱导轮入口及几何参数对离心泵空化特性影响规律研究[D].兰州理工大学,2020.
- [4]翟利静. 开槽叶片提高低比转速离心泵性能的研究[D].兰州理工大学,2019.
- [5]郁金红. 后盖板小叶片对离心泵空化特性的影响研究[D].兰州理工大学,2020.旁通引射流对低比转速离心泵空化性能的影响研究
- [6]赵伟国,徐泽鑫,郁金红,朱昌健.离心泵叶轮后盖板粗糙带抑制空化效果分析[J].华中科技大学学报(自然科学版),2020,48(02):16-22.